

单纵模布里渊掺铒光纤激光器的实验研究

陈 伟 张 艳 任 民 谢 亮 袁海庆 王 欣 祝宁华

(中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要 提出了一种具有多环形腔(MRC)和光纤布拉格光栅可调谐滤波器(FBG-TF)相结合的单纵模布里渊掺铒光纤激光器(BEDFL)。实验中通过观察激光器输出光的拍频信号分析其光谱精细结构,分别讨论了布里渊增益、FBG-TF、MRC对BEDFL单模输出的贡献,给出了激光器的功率特性曲线和波长稳定性测试图。实验得到了在1550 nm处功率为4 dBm,信噪比(SNR)>60 dB,线宽小于1.5 kHz的稳定单纵模输出光。

关键词 激光器; 布里渊掺铒光纤激光器; 受激布里渊散射; 多环形腔; 光纤布拉格光栅可调谐滤波器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082809.1740

Experimental Study of Single-Longitudinal-Mode Brillouin Erbium-Doped Fiber Laser

Chen Wei Zhang Yan Ren Min Xie Liang Yuan Haiqing Wang Xin Zhu Ninghua

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract A single-longitudinal-mode (SLM) Brillouin erbium-doped fiber laser (BEDFL) with multiple-ring cavities (MRC) and fiber Bragg grating tunable filter (FBG-TF) is proposed and demonstrated. The fine structure of optical spectrum is measured by observing the laser beat signals in the experiment, and effects of Brillouin gain, FBG-TF, and MRC on the single-mode output are discussed, respectively. The output characteristic curve and wavelength stability test chart are given. The single-mode output power of 4 dBm with the signal-noise-rate over 60 dB and linewidth of less than 1.5 kHz is achieved.

Key words lasers; Brillouin erbium-doped fiber laser; stimulated Brillouin scattering; multiple-ring cavities; fiber Bragg grating tunable filter

1 引 言

半导体激光器输出光的3dB线宽(半峰全宽, FWHM)是比较大的,如分布反馈式(DFB)半导体激光器其线宽典型值为20 MHz,而光纤激光器(FL)的线宽很窄,可以做到千赫兹量级,甚至几个赫兹(如布里渊光纤激光器)。由于其线宽极窄并且易于调谐而广泛应用于超高精度的相干探测,同时也是实验室理想的相干光源。

采用掺铒光纤(EDF)作为增益介质的FL称之为掺铒光纤激光器(EDFL),目前得到了广泛的研究^[1~3]。受激布里渊散射(SBS)是光纤中抽运波、斯托克斯波通过声波进行的非线性相互作用,对于

1.55 μm 的入射抽运波,后散射的斯托克斯波相对抽运波有9到12 GHz的频率下移(频移的大小与纤芯材料和光纤结构有关);布里渊增益的带宽很窄,其典型值为10~20 MHz。采用布里渊增益作为增益介质的FL称为布里渊光纤激光器(BFL)。一般采用一个具有高精度度的环形腔^[4],通过合理地设计环形腔长度、光耦合器的分光比、损耗以及抽运波长,可以使其在抽运功率小于1 mW的情况下就能产生布里渊激射^[5],但是高精度度腔的储能对腔长极其敏感,温度变化引起的腔长亚波长级改变会导致增益的剧烈变化,从而引起输出功率的不稳定性,同时其输出功率也很小。

收稿日期: 2007-11-09; 收到修改稿日期: 2008-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(60510173, 60536010, 605060067)资助课题。

作者简介: 陈 伟(1982-),男,博士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究工作。E-mail: wchen@semi.ac.cn

导师简介: 祝宁华(1959-),男,研究员,博士生导师,主要从事微波光电子器件的封装与测试等方面的研究。

布里渊掺铒光纤激光器 (BEDFL) 将单模光纤 (SMF) 中的非线性布里渊增益和 EDF 中的线性增益两者结合起来, 利用 EDF 的高增益来弥补光纤谐振腔带来的损耗, 而窄带宽的布里渊增益将激光器激射模式限制在增益带宽内, 减少了模式数量, 提高了单模输出光的信噪比。Gregory J. Cowle 等^[6]对 BEDFL 进行了全面详细的讨论, 本文主要从如何获得单模的角度提出了一种利用多环形腔结构 (MRC) 和光纤布拉格光栅可调谐滤波器 (FBG-TF) 相结合的布里渊掺铒光纤激光器结构。

2 实验装置与原理

多环形腔单纵模布里渊掺铒光纤激光器的实验装置如图 1 所示。该实验系统包括: 可调谐激光器 (Agilent 公司 94819A 型) 作为布里渊抽运源, 将输出功率设置在 9 dBm, 其线宽小于 100 kHz。抽运光经光环形器沿逆时针方向进入长约 500 m 的单模光

纤, 这时会在单模光纤中产生一个顺时针方向的, 3 dB 带宽约为 20 MHz, 频率相对抽运光频率有大约 11 GHz 频率下移的布里渊增益^[7], 这个增益太小, 不足以抵消谐振腔的损耗。由 980 nm 抽运的掺铒光纤放大器 (EDFA) 用于提高增益, 克服谐振腔的损耗。光纤布拉格光栅可调谐滤波器用于抑制自由运转式 EDFL 的激射并实现波长的调谐。每个辅环形腔都是由一个 2×2 的 3 dB 耦合器和一段不同长度的单模光纤构成, 并且在光纤布拉格光栅滤波器和 500 m 单模光纤之间插入隔离器 (ISO) 防止抽运光的传播对系统造成的影响。最后激光通过耦合器 C1 的 10% 端口输出, 然后再经过耦合器 C4 分别进入光谱分析仪 (OSA) 和由光探测器 (PD) 以及电频谱分析仪 (ESA) 组成的频谱测试系统进行测试。实验中使用的测试仪器分别是分辨率为 0.01 nm 的 ADVANTEST 公司 Q8384 型光谱分析仪和 ADVANTEST 公司 R3182 型 RF 频谱分析仪。

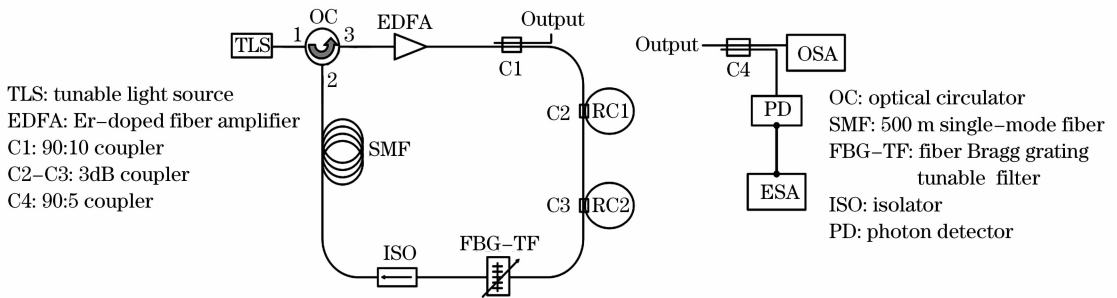


图 1 多环形腔单纵模布里渊掺铒光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Experimental setup of the single-longitudinal mode MRC BEDF laser

多环形腔布里渊掺铒光纤激光器的单模输出是通过光纤光栅滤波器滤波、窄带宽的布里渊增益选模作用以及采用多环形腔增加谐振腔的模式间隔三者共同作用来实现的。首先光纤光栅滤波器的应用抑制了自由运转式光纤激光器的模式激射。一般来说掺铒光纤放大器的增益在整个增益波长范围内并不是完全平坦的, 并且由于放大器处于谐振腔内, 对不同的波长其有效增益也会有所不同^[8], 而布里渊增益相对放大器的增益是很小的, 如果没有滤波器, 则会很容易形成自由运转式光纤激光器激射。一般的光滤波器的带宽都很宽 (实验中使用的 BFG-TF 带宽约为 30 GHz), 要想获得稳定的低噪声单模输出还需进一步减少可能激射光的频率范围, 采用注入抽运光从而产生窄带宽的布里渊增益来实现。如图 2 所示, 激光器模式频率范围被限制在带宽只有约 20 MHz 的布里渊增益区内。由于布里渊增益的

大小与抽运光传播的光纤长度成正相关, 实验中采用了一段较长的光纤 (500 m)。对于长度为 L 的环形谐振腔腔长, 输出激光的模式间隔 (即自由光谱范围 FSR) 与腔长成反比:

$$R_{fs} = \frac{c}{n_{\text{eff}}L}, \quad (1)$$

式中 c 为真空中光速, n_{eff} 为光纤的有效折射率, 准确地说 $n_{\text{eff}}L$ 为光在光纤回路中的光程。如图 2 所示, 由于采用了较长的光纤回路 (>500 m), 模式间隔较小 [$R_{fs}(m) < 0.4$ MHz], 因此在布里渊增益区内有近百个模式可能激射。采用多环形腔结构, 根据 Vernier 效应^[3,9], 很容易得到模式间隔大于布里渊增益带宽的模式间隔 (有效自由光谱范围)。通过微调抽运光波长从而改变布里渊增益的频率位置, 使得布里渊增益的峰值对准其中的一个模式, 就可得到 BEDFL 的低噪声单模输出。

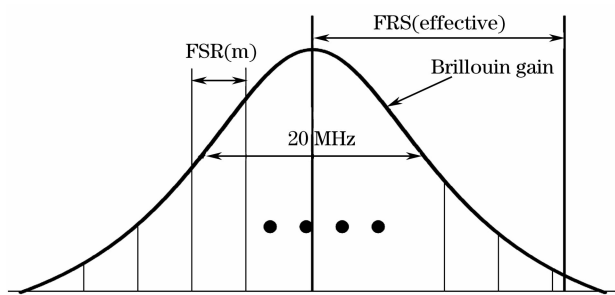


图2 布里渊单环形腔掺铒光纤激光器模式选择示意图
Fig.2 Schematic of mode selection of single-ring-cavity
BEDFL

3 实验结果与讨论

实验表明如果没有 FBG-TF, 当抽运光波长远离 EDFA 增益峰处时, 则自由运转的 EDFL 将在 1561 nm 附近激射, 激射波长对应 EDFA 增益峰。当抽运波长足够靠近 EDFA 增益峰 (1561 nm 附

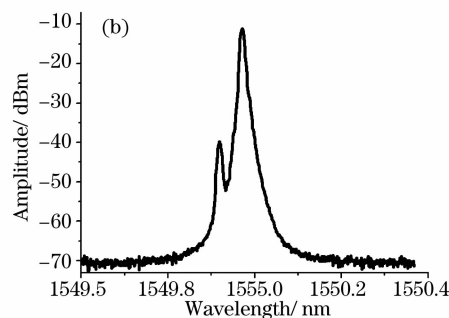
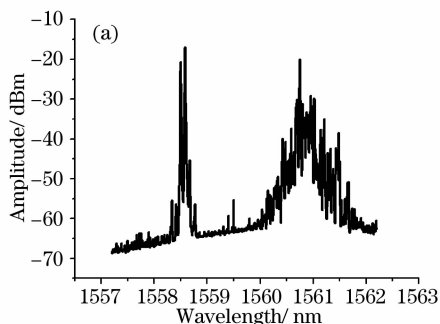


图3 激光器输出光谱。(a)没有 BFG-TF 和 MRC, BEDFL 和 EDFL 同时激射, (b) 加入 BFG-TF 和 MRC 后
Fig.3 Spectrum of laser output measured with OSA. (a) Without BFG-TF and MRC, with BEDFL and EDFL running
simultaneously, (b) with BFG-F and MRC

实验中通过光光校准的矢量网络分析仪测量了没有次环形腔的主环形腔的光程 (矢量网络分析仪延时电长度) 为 846.1 m, 由(1)式计算出主环形腔的模式间隔为 0.354568 MHz。图 4(a)所示为 0~100 MHz 频率范围内测量的拍频频谱图, 从图中可以看出零频率附近拍频信号幅度最大, 由于布里渊增益 3 dB 带宽只有 20 MHz 左右, 随着频率的增加拍频信号幅度迅速下降。这同时也证明了由于布里渊增益, 激光器的谐振模式被限制在布里渊增益区内。如果是因 FBG-TF 选频, 再由高精度度主腔结合复合腔滤波产生的 EDFL 的激光输出, 其频谱幅度应该在 FBG-TF 带宽 0~30 GHz 范围内缓慢下降。图 4(b)为 0~10 MHz 的频谱图, 可以清楚地看到在测试频率范围 (0~10 MHz) 内总共有约 28.2 个等频率间隔的拍频信号, 由此我们计算出模式间隔为 0.3546 MHz。而(1)式可计算出激光器的模式

近)时, 则自由运转式 EDFL 被抑制, 形成布里渊增益带内的波长激射。当抽运波长和 EDFA 增益峰距离合适, 此时对应两个波长位置的增益基本相等, 则有可能两波长同时激射, 如图 3(a)所示。FBG-TF 的应用使得自由运转式 EDFL 被完全抑制, 并且大波长范围的调谐变得容易实现。实验中只运用滤波器就能得到很好的激光, 这得益于布里渊增益的窄带宽, 这时从光谱仪上测量的输出激光光谱与图 3(b)类似, 信噪比也能达到 60 dB。需要说明的是光谱上左边的小峰是抽运光在光纤中的瑞利散射光 (散射光频率与抽运光频率相同) 以及光纤接头的反射光通过 EDFA 放大后形成的光谱, 其强度比 BEDFL 激射光小了 30 dB。因为光谱仪的分辨率有限 (0.01 nm), 无法展现窄带宽布里渊增益内的多模情况, 因此可通过探测器和微波频谱仪来观察多模间的拍频信号来分析光谱的精细结构。

间隔为 $R_{fs} = c / (n_{eff} L) = 300000000 / 846.1 = 0.354568$ MHz, 两者基本相符。出现如此多的模式是不希望的, 在引入一个腔长为 0.4 m 的辅环形腔之后, 拍频模式大为减少, 如图 4(c)所示。理论上说加入这个辅腔后, 模式间隔约 500 MHz, 远远超过了布里渊增益的带宽, 激光器的输出光应该是很理想的单模输出。但是由于光纤系统的偏振的不稳定性以及外界环境的影响, 主环形腔对应的某些模式能随机地形成谐振, 因而出现图 4(c)所示的拍频噪声, 但是其信号幅度相对图 4(b)小了近 30 dB, 可见系统的不稳定性形成的边模相对主模幅度很小。当加入长度分别为 0.4 m 和 3.2 m 的两个辅环形腔后, 虽然模式间隔仍然是约 500 MHz, 但是拍频噪声不见了, 如图 4(d)所示。测量得到的输出光谱图如图 3(b)所示, 激光信噪比达到了 60 dB。

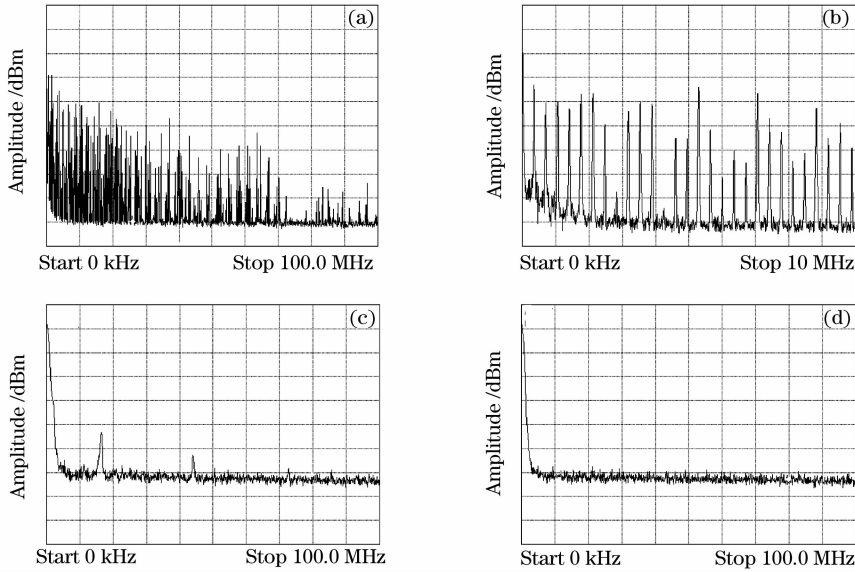


图 4 激光输出光拍频频谱图。(a)没有 MRC 结构,(b)没有 MRC 结构且频率范围是 0~10 MHz,(c)只加入长度为 0.4 m 的次环形腔,(d)加入长度分别为 0.4 m 和 3.2 m 的两个次环形腔

Fig. 4 Beat frequency spectrum of the MRC BEDFL. (a) Without MRC, (b) without MRC and with frequency range of 0~10 MHz, (c) with only a subring cavity of 0.4 m, (d) with two-subring cavities of 0.4 m and 3.2 m

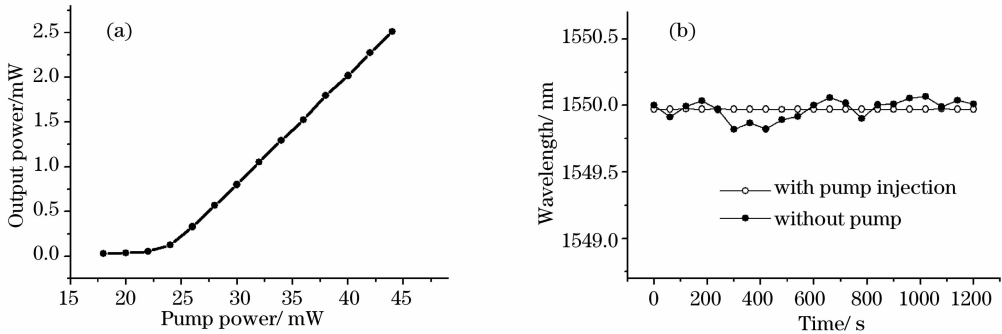


图 5 BEDFL 功率特性曲线(a)及波长稳定性测试(b)

Fig. 5 Output power characteristic curve (a) and measured central wavelength variation (b)

图 5(a)为激光器的输出特性曲线,阈值抽运功率为 24 mW,斜率效率为 12%。EDFA 抽运功率为 45 mW 时,激光器输出功率约为 4 dBm。激光器的

波长稳定性如图 5(b)所示,当没有布里渊增益抽运光时,激光器的波长随时间波动比较大,波长以 1549.97 nm 为中心上下幅度在 0.15 nm 范围内波动。当加入布里渊抽运光后,波长能较长时间保持稳定。

通过传统的延迟自外差方法测量了拍频噪声谱的线宽,由于是两模式间的拍频噪声线宽,单模输出光的线宽为测量值的一半。如图 6 所示,仪器测量的线宽(3 dB)小于 3 kHz,由此认为 BEDFL 输出光的线宽小于 1.5 kHz。

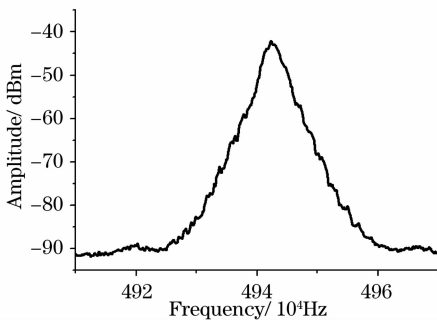


图 6 BEDFL 拍频噪声谱线宽测试图

Fig. 6 Beat noise spectrum of BEDFL for linewidth measurement

4 结 论

报道了一种结构新颖的布里渊掺铒光纤激光器,并从理论和实验对它进行了分析和测试。通过

在主环形腔中加入滤波器以抑制自由运转式光纤激光器的激射,与两个辅环形腔相结合的多环形腔结构实现了模式抑制,获得了稳定的单模输出,其信噪比超过了 60 dB,线宽小于 1.5 kHz。

参 考 文 献

- 1 Yu Benli, Zhen Shenglai, Zhu Jun *et al.*. Experimental study on low-noise fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 217~220
俞本立,甄胜来,朱 军等. 低噪声光纤激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 217~220
- 2 Wang Dong, Zhang Minming, Liu Xiaoming *et al.*. 100 nm widely tunable Er-doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1289~1292
王 东,张敏明,刘晓明等. 100 nm 宽光谱可调谐掺铒光纤激光器[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1289~1292
- 3 Zhang Xin, Chen Wei, Liu Yu *et al.*. Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency stabilization[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(1): 50~54
张 欣,陈 伟,刘 宇等. 单纵模多环形腔掺铒光纤激光器及其稳定性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 50~54
- 4 L. F. Stokes, M. Chodorow, H. J. Shaw. All-single-mode fiber resonator[J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(6): 288~290
- 5 L. F. Stokes, M. Chodorow, H. J. Shaw. All-fiber stimulated Brillouin ring laser with submilliwatt pump threshold[J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(10): 509~511
- 6 Gregory J. Cowle, Dmitrii Yu. Stepanov, Yew Tai Chieng. Brillouin/erbium fiber lasers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(7): 1198~1204
- 7 Aydin Yeniay, Jean-Marc Delavaux, Jean Toulouse. Spontaneous and stimulated Brillouin scattering gain spectra in optical fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(8): 1425~1432
- 8 Li Tangjun, Cui Jie, Tong Zhi *et al.*. Integration of dispersion compensation and EDFA gain-equalization [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, **24**(2): 104~106
李唐军,崔 杰,童 治等. 色散补偿及 EDFA 增益均衡的一体化[J]. *半导体光电*, 2003, **24**(2): 104~106
- 9 Jianluo Zhang, John W. Y. Lit. All-fiber compound ring resonator with a ring filter[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(7): 1256~1261